聚结滤芯层数对滤材内液体含量的影响

刘佳霖 姬忠礼 常程 郝翊彤

（中国石油大学（北京），过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室，北京 102249）

摘 要：本文利用聚结滤芯过滤性能的检测装置，通过滤材层数的梯度增加，研究了不同润湿性聚结滤芯内部液体分布特性，分析了滤材层数、滤材润湿性对饱和度、压降的影响。结果表明：随着滤芯层数的增多，亲油型滤材饱和度呈“凹形”分布的趋势愈加明显，即亲油型滤材第一层饱和度没有明显变化，中间层饱和度逐渐降低，最后一层饱和度又达到一致水平；而疏油型滤材饱和度曲线重合度很好，没有明显变化。随着滤芯层数的增多，亲油型滤材与疏油型滤材的总体压降趋势均没有变化，但亲油型滤材润湿压降呈下降趋势，而疏油型滤材润湿压降没有明显变化。

关键词：聚结；滤芯层数；过滤；饱和度；压降

中图分类号：TQ028.2；TE832 **文献标识码**：A

Influence Of The Number Of Coalescing Filter Layers On The Liquid Content In Filter Media

LIU Jia-Lin, JI Zhong-Li, CHANG Cheng, HAO Yi-Tong

(Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, College of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: In this paper, the characteristics of the liquid distribution in different wettability coalescing filters are studied experimentally through the increase of the number of filter layers. The influence of filter layer number and filter wettability on the saturation and pressure drop are analysed. The results show that with the increase of the number of filter layers, the saturation tendency of oleophylic filters becomes "concave" obviously, that is, the saturation of the first layers have no obvious change and the saturation of interlayers gradually decrease, and the saturation of the last layers reach the same level. The oil saturation curves of oleophobic filters are very good and have no obvious change. With the increase of the number of filter layers, the overall pressure drop trend of oleophylic filters and oleophobic filters media did not change, but the wetting pressure drop of oleophylic filters showed a decreasing trend through the increase of the number of filer layers, but it did not change significantly in oleophobic filters.

Key words: coalescence; filter layers; filtration; saturation; pressure drop

0 引言

在长距离管道天然气输送过程中，天然气内含有的液态杂质会对管道设备造成损害，严重影响离心压缩机及燃气轮机的安全运行。为了除去天然气中夹带的液滴，长输管线的压气站及分输站内一般安装卧式过滤分离器及立式聚结过滤器等装置对天然气进行净化处理。其中，聚结过滤器精度要求最高，根据天然气管道输送要求，其对粒径大于 0.3μm 的液滴分离效率应达到 99.8%。聚结滤芯作为聚结过滤器的核心元件，其过滤性能直接决定着天然气内微小颗粒的净化效果，因此，对其过滤机理的研究具有重要意义。

近年来，国内外学者对聚结滤芯的研究主要集中在气液过滤性能影响因素的考察[1-2]、纤维与液滴的毛细作用[3-5]、稳态压降与饱和度的模型建立[6-9]等方面，且多以亲油型滤材为研究对象，而对疏油型滤材及工业用整根滤芯的实际综合气液过滤性能研究较少。Kampa 等人[10-11]研究了在过滤过程中液体的运输，对多层润湿性和非润湿性的滤材进行实验，得到了饱和度随时间变化的关系；提出了“跳跃—通道”半定量模型，即在过滤过程中，滤材被润湿的内部会形成多个独立的通道，气体夹带液滴，会通过这些通道进入到下一层，对于不同润湿性的滤材，会在滤材的最内或者最外层形成液膜。同时他们还通过不同润湿性滤材组合搭配证明了该模型。Chang 等人[12]研究了滤芯排液层对亲油型滤芯内液体分布的影响，发现当滤芯液膜形成时，滤芯

内部饱和度开始上升并解释了其原因。

目前对于气液过滤过程中，滤芯内部液体分布情况研究较少，液体在滤芯内部运移机理有待进一步探索。因此本文利用一套聚结滤芯过滤性能的实验装置，通过滤材层数的梯度增加，来对不同润湿性聚结滤芯内部液体分布进行研究，测定分析滤材层数、滤材润湿性对饱和度、压降的影响。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

滤芯结构组成如表 1 所示。本文采用 8 种规格的圆柱缠绕型滤芯进行实验，分别记为 A4—A10、B4—B10，滤芯内径为 50mm，有效过滤长度为 105mm。其中，滤材 A 为亲油型玻璃纤维滤材，滤材 B 为疏油型玻璃纤维滤材。实验液体采用目前国际测试标准规定的的癸二酸二辛酯（DEHS），在 25℃时，其密度为 912 kg m^{-3}，动力粘度为 0.023 Pa s，此温度下测得实验液体与滤材 A、B 的接触角分别为 66.35 °和 122.68 °。

表 1　滤芯结构组成

Table 1　Structure of experimental filter cartridges

型号	内层滤材
A4	4 层亲油型玻璃纤维 A
A6	6 层亲油型玻璃纤维 A
A8	8 层亲油型玻璃纤维 A
A10	10 层亲油型玻璃纤维 A
B4	4 层疏油型玻璃纤维 B
B6	6 层疏油型玻璃纤维 B
B8	8 层疏油型玻璃纤维 B
B10	10 层疏油型玻璃纤维 B

滤芯内部滤材具体的物性参数见表 2。其中，滤材厚度及克重由测量得到，测量值与滤材厂家提供的参数基本一致。滤材填充密度由滤材厚度、克重及滤材密度计算得到。

表 2　滤材物性参数

Table 2　Properties of experimental filter materials

材料	厚度/mm	克重/g m^{-2}	填充密度
玻璃纤维 A	0.40	78	0.072
玻璃纤维 B	0.42	72.7	0.065

1.2 实验装置

根据中国、美国及欧洲相关测试标准[13-16]，建立了聚结滤芯检测装置，如图 1 所示。该装置可对聚结滤芯的气液过滤性能进行评价。在测试过程中将系统温度维持在 24℃~26 ℃范围内，相对湿度维持在 50%~56 %范围内。

在真空泵抽气作用下，在上游洁净的气体与 0.18MPa 压缩气体通过气溶胶发生器所发生的气溶胶混合，滤芯垂直放置，气流由滤芯内向外穿过，气体中夹带的油滴被滤芯拦截过滤，小油滴聚结成大油滴，过滤后的液体进入集液瓶。

实验过程中，滤芯的压降变化由压差变送器（BF3051DP，U=0.021mA，上海倍福）实时记录。气溶胶的浓度由光学粒子计数器（Weals 3000，PALAS）在滤芯上、下游采样处测量得到。滤材重量变化情况由电子分析天平（AL204-IC，Ⅰ 级，METTLER TOLEDO）称重得到。

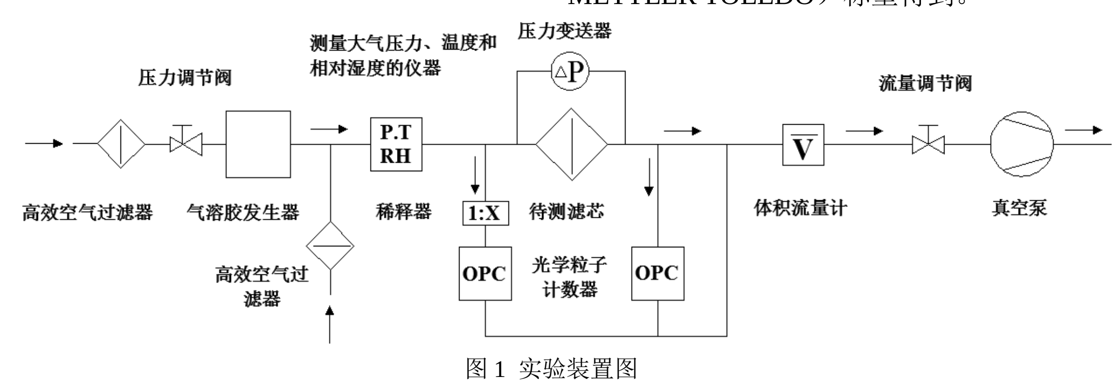


图 1 实验装置图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental set-up

2 实验结果及分析

2.1 滤芯层数对亲油型滤材饱和度的影响

利用实验装置，在表观气速 0.10 m•s^{-1}、气体含液浓度 500~700 mg•m^{-3} 条件下对滤芯 A、B 进行实验。根据 ISO12500 标准，规定当滤芯压降在 1 小时内变化小于 1%时认为滤芯达到稳定状态，可以认为状态下测得的滤芯效率和阻力为滤芯的评价性能数据，故在稳定状态下对滤芯进行拆解，分析滤芯内液体分布情况。将滤芯内部各层玻璃纤维制成 150 mm×100 mm 矩形片，利用电子天平称重并与未过滤前滤材重量相比较，即得到滤材持液量及稳态下滤芯饱和度 S，S 可按照下式进行计算。

$$S=\frac{V_{\text{oil}}\rho_{\text{oil}}}{V_{\text{void}}\rho_{\text{oil}}}=\frac{m_{\text{oil}}}{m_{\text{oil,max}}}=\frac{m_{\text{filter}}-m_{\text{filter,0}}}{m_{\text{oil,max}}} \qquad (1)$$

其中，V_{void} 可用公式（2）进行计算。

$$V_{\text{void}}=V(1-\alpha) \qquad (2)$$

上面两式中，V_{oil} 为实验介质在滤材内所占据的体积，ρ_{oil} 为实验介质密度，V_{void} 为滤材空隙体积，m_{oil} 为滤芯中液体持液量，m_{filter}为实验后滤芯质量，$m_{\text{filter,0}}$为实验前滤芯质量，$m_{\text{oil,max}}$ 为理论上滤芯最大持液量，V 为滤材总体积，α 为填充密度。

称重之后，为了更好地观测各层液体分布的情况，在各层滤材正下方进行打光照射，在其正上方用数码相机（SONY α500）进行微距拍摄，得到各层液体分布图。

图 2 为实验终止后滤材 A4—A10 内部各层滤材饱和度情况。从图中可以看出，不同层数的滤芯饱和度曲线大致呈楔形，不同层数的滤芯，第一层饱和度基本一致，中间层饱和度逐渐降低，最后一层饱和度大致相同。分析认为：不同层数对于第一层饱和度基本没有影响。气体夹带液滴直接被第一层拦截，饱和度高低更多是依靠滤材本身的性质与结构（纤维的形态结构、比表面积、孔隙分布、表面化学能），不同层数对其影响很小。在浓度与气速不变的情况下，第一层滤材会达到自身的某种饱和状态；根据“跳跃—通道”理论[10-11]，油滴首先会在滤材高渗透率的地方聚结、穿透，然后会在低渗透率的地方找寻通道，随着层数的增加以及亲油型滤材纤维与液滴的毛细作用比较强，很多油滴被拦截，并快速的被四周洁净纤维吸收，从而导致被下一层拦截油滴越来越少，每层形成的通道数目越来越少，每层饱和度越来越低。从图中还可以发现对于不同规格滤芯的同一层饱和度也呈现出随着层数增加，饱和度下降，这是因为，因为亲油型滤材本身的性质，所以滤芯内洁净的滤层对其之前已经润湿的滤层的毛细作用比较强，层数越多，毛细作用越强，从而使得每一层润湿面积越来越小，饱和度下降。

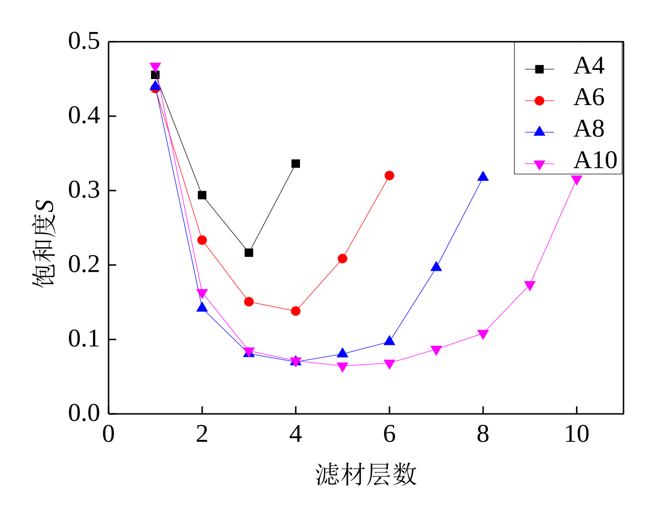


图 2 不同层数的亲油型滤芯内部各层饱和度对比

Fig. 2 Saturation of each layer within oleophilic filter cartridges of different layers

拆解 A10，取其中 1、3、5、7 层进行对比分析。从拆解图 3 中（明亮的部分为润湿部分，灰暗的部分为洁净部分）可以看出明亮的面积在减少，即润湿面积在减少。说明对于亲油型滤材，滤材层数增加，各层饱和度减小，而最后的 2~3 层的饱和度会上升，是因为液膜的存在，Kasper 等人[10-11]间接验证了外部存在液膜，当停气之后，对于亲油滤材，会吸收液膜，对于孔隙率比较小的滤材来说，这种倒吸，会形成新的液体运移通道，造成后续各层饱和度的升高。不同层数滤芯的最后一层饱和度大致相同，这说明滤材层数对于液膜厚度基本没有影响。

2.2 滤芯层数对疏油型滤材饱和度的影响

图 4 为 B10 拆解图。（图中明亮的部分为润湿部分，灰暗的部分为洁净部分）对 B10 进行拆解，取其 1、3、5、7 层进行对比，可以看出除第一层外，其余各层润湿面积大致相等。图 5 为不同层数的疏油型滤芯内部各层饱和度曲线，不同层数的滤芯的饱和度呈现了一致的趋势，即第一层的饱和度一致，在大约 0.55 左右，之后饱和度稳定至 0.1 并且各层饱和度基本一致。结合图 4 与图 5 可以发现：滤芯层数对于疏油型滤材饱和度没有影响。

分析认为：第一层饱和度基本一样并且远高于其他各层，其原因跟亲油型的类似，在气体中的油

滴首先与第一层接触，大多被第一层拦截，滤材层数变化对其所能吸收液体量的能力影响不大，在气速和浓度不变的情况下，即使层数不同，第一层最终也会达到自身的一种饱和状态，而之所以高于其他各层，根据“跳跃—通道”理论[10-11]，对于疏油性滤材，由于纤维表面能没有亲油性大，液体在填充之后会在第一层最先接触油滴的一侧形成液膜，形成液膜的过程中，由于气体的“挤压”会有一部分液体被第一层吸收，同时对于这种疏油材料来说，填充密度相对较高，孔径较小，毛细作用较强，所以在毛细作用下，滤材第一层也会吸收一部分液体；之后饱和度骤降，且对于层数不同的滤芯，各层饱和度均稳定在一致的水平，根据“跳跃—通道”理

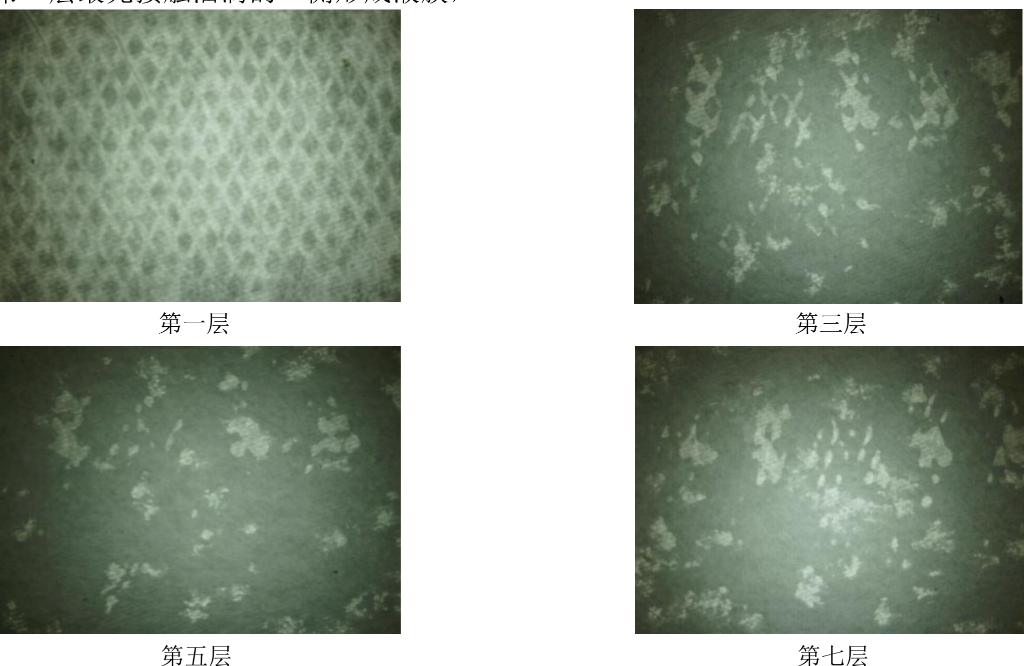


图 3 滤芯 A10 各层（1、3、5、7）拆解图

Fig. 3 Disassembly pictures of A10 filter cartridges

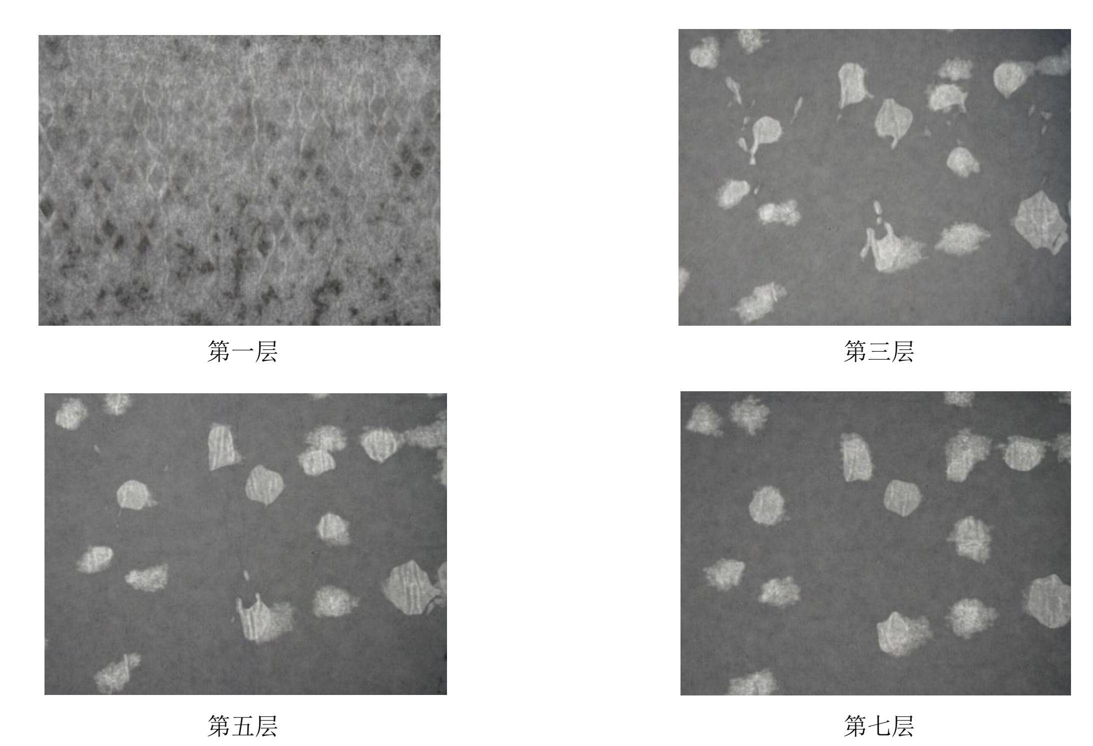


图 4 滤芯 B10 各层（1、3、5、7）拆解图

Fig. 4 Disassembly pictures of B10 filter cartridges

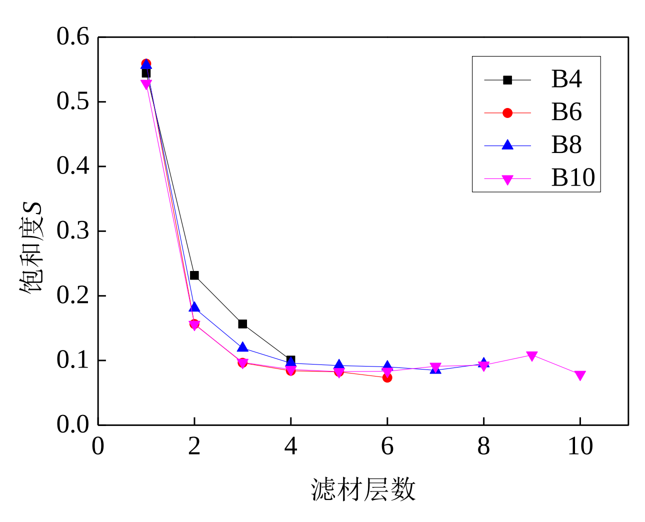


图 5 不同层数的疏油型滤芯内部各层饱和度对比

Fig. 5 Saturation of each layer within oleophobic filter cartridges of different layers

论[10-11]，层数的增加，相当于增加了通道的长度，再加上疏油型滤材的本身特点，纤维的毛细作用没有亲油性滤材强，正如图 4 拆解图所示，在运输过程中通道的数目没有减少的像亲油型滤材明显。所以在同浓度同气速的操作条件下，各层在稳定状态均会达到相同的饱和状态。

2.3 滤芯层数对亲油型滤材压降的影响

由图 6 可知，滤材层数的变化对于亲油型滤材的整个压降走势没有影响，之后会具体分析压降走势。初始压降随着层数增加而增大，这是因为层数增加，纤维层厚度增加，增大了对气体的阻力。为了研究滤芯层数对液体运移的影响，需计算润湿压降。润湿压降为过滤后稳定压降与初始压降之差。

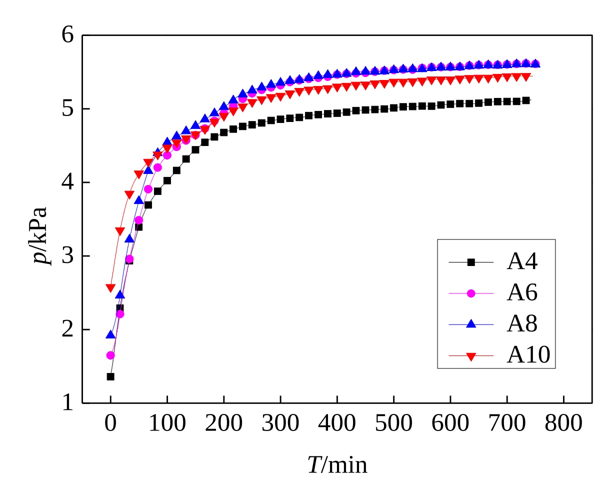


图 6 不同层数的亲油型滤芯过程压降曲线

Fig. 6 Evolution of pressure drop of oleophilic filter cartridges of different layers

由图 7 可知，随着滤材层数的增加，润湿压降呈现下降的趋势。分析认为：由于亲油型滤材的纤维表面能大，在过滤过程中，湿润的面积大，润湿面积随着层数增加而明显减小，根据 Contal 等人[17]的分析可知，压降的上升是由于纤维之间的空隙被液体填充，这对之后的气体产生了很大的阻力。这也就解释：对于亲油型滤材，虽然层数增加，纤维对气体的阻力增大，但润湿面积大大减少，之前对其进行的饱和度分析以及拆解图 3 可以看出润湿面积的明显变化。润湿面积对压差大小有很大影响。所以对于亲油型滤材，层数越多，润湿压降越低，但引起润湿压降低的原因不是层数，而是润湿面积。

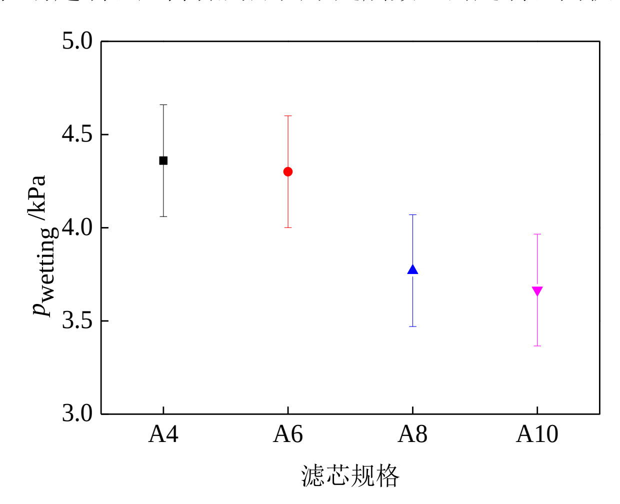


图 7 不同层数的亲油型滤芯润湿压降对比

Fig. 7 Wetting pressure drop of oleophilic filter cartridges of different layers

以 A6 为例，亲油型滤材过程压降趋势如图 8 所示。将其分为四个阶段，第一个阶段压降急剧增长，第二个阶段压降缓慢增长，第三个阶段压降增长趋势介于第一和第二阶段之间，并且最终达到第四阶段，即平稳阶段。

分析认为：第一阶段，液滴进入第一层滤材，并在滤材内部形成液体运移的通道，但是由于材料自身特性，液滴到达第一层表面的速度大于通道形成的速度，导致液滴在第一层的表面累积，形成一层液膜，这层液膜对气流产生了很大的阻碍，导致了压降的急剧上升；第二个阶段，液滴逐层进入滤材，并在层与层之间形成液体运移的通道，而这些通道对气流有一定的阻碍作用，导致压降的平缓上升；第三个阶段，当液滴运动到最后一层，由于液滴与亲油型滤材的黏附力要大于液滴内部分子之间的内聚力，所以液滴此时会在最后一层累积，同样会形成一层很薄的液膜[10-11]，此时下游液滴计数浓度急剧增高印证了液膜的存在。当液滴累积到自身

重力大于黏附力时，会从液膜脱落在浓度以及气量不变的情况下，当进入油滴的量和出去的油滴的量达到平衡时，则达到了最终的第四阶段—稳态阶段。

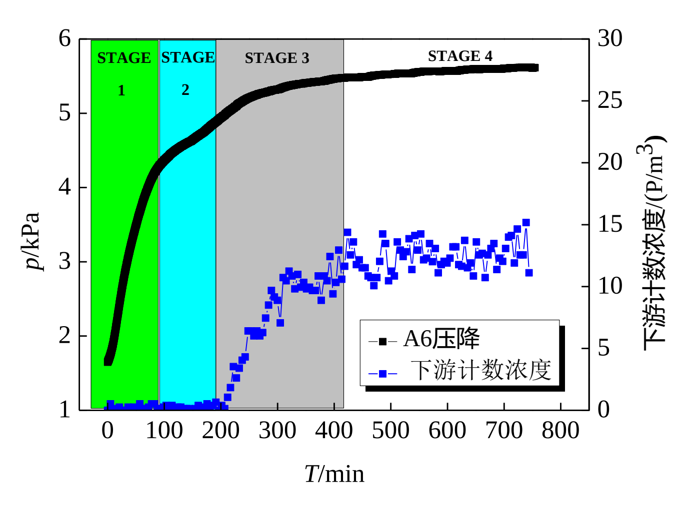


图 8 亲油型滤芯过程压降曲线

Fig. 8 Evolution of pressure drop of oleophilic filter cartridges

2.4 滤芯层数疏油型滤材压降的影响

由图 9 可知，滤材层数变化对于疏油型滤材的整个压降走势同样没有影响。根据图 10 压差的对比，可以发现随着层数的增加，压差没有明显的差别，在大约 5.5kPa 附近上下波动。

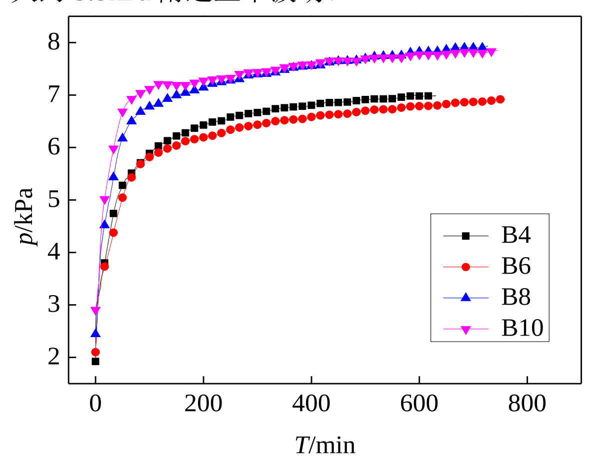


图 9 不同层数的疏油型滤芯过程压降曲线

Fig. 9 Evolution of pressure drop of oleophobic filter cartridges of different layers

分析认为：从有关饱和度分析可知，对于疏油性滤材随着层数增加，各层饱和度没有明显变化，由拆解后的图 5 也可以看出各层润湿面积大致相等，这是因为疏油性滤材自身的性质，纤维毛细作用弱，湿润面积不容易被纤维扩大，虽然层数逐渐增多，但各层润湿面积没有明显变化，所以层数的不同，对疏油性滤材的压降没有明显影响。这同样也说明，润湿面积的大小是影响压降的主要因素。以 B6 为例，疏油型滤材总体压降如图 11 所示。

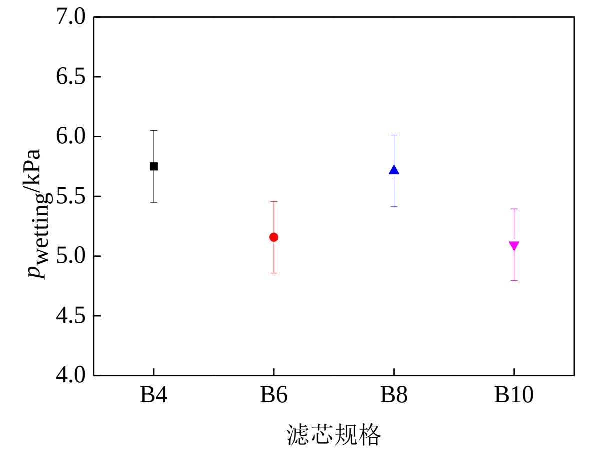


图 10 不同层数的疏油型滤芯压差对比

Fig. 10 Wetting pressure drop of oleophobic filter cartridges of different layers

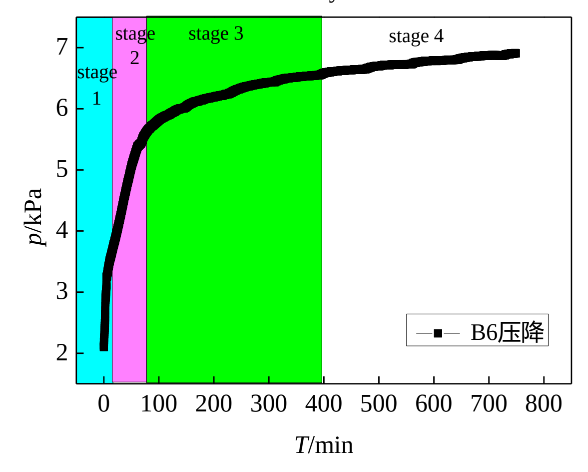


图 11 疏油型滤芯过程压降曲线

Fig. 11 Evolution of pressure drop of oleophobic filter cartridges

整个压降过程也分为四个阶段，第一个阶段压降几乎成直线上升，第二个阶段压降急剧上升，第三个阶段，压降缓慢上升至第四阶段—稳定阶段。与亲油型滤材压降过程不同，疏油型滤材前面两个阶段均是急剧上升。第一个阶段为液体接触第一层并快速填充之后在其表面形成了液膜，这是由于疏油型滤材的纤维与液滴的毛细作用较弱，纤维不容易被润湿，气流中液滴的到达第一层聚集的速度远大于纤维内部吸收、运移液体的速度，导致在其表面形成液膜，对气流产生阻力，压降直线上升。当液膜稳定后，第一层滤材也被逐渐润湿，滤材空隙被液体填充，液体运移通道逐渐形成，其阻碍气流穿过，造成压降上升。第三阶段为其余各层对气流的影响，类似于亲油滤材的第二阶段，根据 Mullins 等人[3]提出的毛细管理论，由于疏油型滤材纤维的纤

维表面能低，油滴在最外层更容易聚结形成大液滴，当其重力大于纤维对液滴的表面力时，液滴则会脱落。最终达到稳定。

3 结论

本文利用聚结滤芯过滤性能的检测装置，通过滤材层数的梯度增加，来对不同润湿性聚结滤芯内部液体分布进行研究，测定分析滤材层数、滤材润湿性对饱和度、压降的影响。通过实验结果的分析得出以下结论：

（1）随着滤芯层数的增多，亲油型滤材饱和度呈凹形分布的趋势愈加明显，即亲油型滤材第一层饱和度没有明显变化，中间层饱和度逐渐降低，最后一层饱和度又达到一致水平。滤芯层数的改变对液膜厚度没有影响。

（2）随着滤芯层数的增多，疏油型滤材饱和度曲线重合度很好，没有明显变化。第一层滤材的饱和度高于其他各层饱和度，其他各层饱和度没有明显波动。

（3）随着滤芯层数的增多，亲、疏油型滤材压降趋势均没有变化，但对于亲油型滤材，润湿压降呈下降趋势，而疏油型滤材润湿压降没有明显变化。其中润湿面积对其影响很大。

参考文献

[1] Charvet A, Gonthier Y, Bernis A, et al. Filtration of liquid aerosols with a horizontal fibrous filter[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86: 569-576

[2] 熊至宜，姬忠礼，冯亮，等. 聚结滤芯过滤元件过滤性能影响因素的测定与分析[J]. 化工学报，2012，63（6）:1742-1748

XIONG Zhiyi, JI Zhongli, FENG Liang, et al. Measurement and analysis on influencing factors of filtration performance of filter coalescer element [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2012, 63(6): 1742-1748.

[3] Benjamin J, Mullins B J, Roger D, et al. Capillarity in fibrous filter media: Relationship to filter properties [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62: 6191-6198

[4] Mullins B J, Braddock R D, Agranovski I E, et al. Observation and modeling of clamshell droplets on vertical fibers subjected to gravitational and drag forces[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 284:245-254

[5] Mullins B J, Braddock R D, Agranovski I E, et al. Observation and modeling of barrel droplets on vertical fibers subjected to gravitational and drag forces[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 300:704-712

[6] Mead-Hunter R, Braddock R D, Kampa D, et al. The relationship between pressure drop and liquid saturation in oil-mist filters – Predicting filter saturation using a capillary based model[J]. Separation and Purification Technology, 2013, 104: 121-129

[7] Frising T, Thomas D, Bémer D, et al. Clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: Experimental and phenomenological modeling study[J], Chemical Engineering Science, 2005,60: 2571-2762

[8] Charvet A, Gonthier Y, Gonze E, et al. Experimental and modeled efficiencies during the filtration of a liquid aerosol with a fibrous medium[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65: 1875-1886

[9] Mead-Hunter R, King A J C, Mullins B J. Aerosol-mist coalescing filters – A review[J]. Separation and Purification Technology, 2014, 133: 484 -506

[10] Kampa D, Wurster S, Buzengeiger J, et al. Pressure drop and liquid transport through coalescence filter media used for oil mist filtration[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, 58: 313-324

[11] Kampa D, Wurster S, Meyer J, et al. Validation of a new phenomenological "jump-and-channel" model for the wet pressure drop of oil mist filters[J]. Chemical Engineering Science.2015, 122: 150-160

[12] CHANG Cheng, JI Zhongli, LIU Jialin. The effect of a drainage layer on the saturation of coalescing filters in the filtration process.[J]. Chemical Engineering Science.2017, 160: 354-361

[13] GB/T 6165—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008

[14] EN 779: 2012 [S]. England : The British Standards Institution, 2012

[15] ASHRAE 52.2:2007[S].America: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2007

[16] 常程，姬忠礼，黄金斌，等. 气液过滤过程中液滴二次夹带现象分析[J]. 化工学报, 2015, 66(4): 1344-1352

CHANG Cheng, JI Zhongli, HUANG Jinbin, et al. Analysis of re-entrainment in progress of gas-liquid filtration[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2015, 66(4): 1344-1352.

[17] Contal P, Simao J, Thomas D, et al. Clogging of fiber filters by submicron droplets. Phenomena and influence of operating conditions[J]. Journal of Aerosol Science, 2004, 35: 263-278